

УДК 66.045:51-74

Роман Коцюрко, Ігор Лучейко, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

### ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ ТИПУ «ЗМІШУВАННЯ–ЗМІШУВАННЯ» ЯК ПРОТОЧНИЙ РЕАКТОР ІДЕАЛЬНОГО ЗМІШУВАННЯ В НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Показано деякі особливості поведінки ідеального теплообмінного апарата типу «змішування – змішування» у режимі гармонічного коливання температури теплоносія на входах апарата.

Ключові слова: теплообмінний апарат, проточний реактор ідеального змішування, гармонічне коливання температури, математичне моделювання.

#### Roman Kotsiurko, Igor Lucheyko IDEAL "MIXING–MIXING" HEAT EXCHANGER AS CONTINUOUS STIRRED-TANK REACTOR AT UNSTATIONARY MODE

Some features of the behavior of the ideal "mixing–mixing" HE in the mode of harmonic temperature fluctuations of the HE at the inputs of the device are shown.

Keywords: heat exchanger, mathematical modeling, continuous stirred-tank reactor, harmonic temperature fluctuations.

Задача Коші, що описує роботу теплообмінного апарату (ТА) типу «змішування–змішування» в нестационарному режимі, обумовленому коливаннями температур на входах, має вигляд:

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{01} \frac{d\Delta\theta_1}{d\bar{\tau}} + (1 + A_1)\Delta\theta_1 - A_1\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1^{\text{BX}}(\bar{\tau}) \\ \frac{d\Delta\theta_2}{d\bar{\tau}} + (1 + A_2)\Delta\theta_2 - A_2\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2^{\text{BX}}(\bar{\tau}) \\ \bar{\tau} = 0, \Delta\theta_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\bar{\tau}_{0i} = \tau_{0i} / \tau_{02}$  – середній час перебування  $i$ -го теплоносія (ТН) в одиницях часу перебування холодного ТН в зоні теплообміну;  $\Delta\theta_i^{\text{BX}} = \theta_i^{\text{BX}} - \theta_{0i}^{\text{BX}}$ ,  $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{0i}$  – абсолютні відхилення температур від номіналів;  $\theta_i^{\text{BX}} = T_i^{\text{BX}} / T_{02}^{\text{BX}}$ ,  $\theta_i \equiv \theta_i^{\text{BHX}} = T_i / T_{02}^{\text{BX}}$  – відносні температури на входах та виходах апарата;  $A_i \equiv A_{0i} = kF / v_i c_i$  – безрозмірні числа перенесення ( $k$  – коефіцієнт теплопередачі,  $F$  – площа поверхні теплообміну,  $v_i$  – об'ємні швидкості потоків,  $c_i$  – питомі об'ємні теплоємності ТН). У спрощеному випадку рівності  $\bar{\tau}_{01} = \bar{\tau}_{02} = 1$  середніх часів перебування ТН і рівності  $\Delta\theta_{i\text{max}}^{\text{BX}} = E_1^{\text{BX}} = E_2^{\text{BX}} \equiv E$  амплітуд гармонічних коливань температури, (1) набуде вигляду

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\theta_1}{d\bar{\tau}} + (1 + A_1)\Delta\theta_1 - A_1\Delta\theta_2 = E \sin \bar{\omega} \bar{\tau} \\ \frac{d\Delta\theta_2}{d\bar{\tau}} + (1 + A_2)\Delta\theta_2 - A_2\Delta\theta_1 = \pm E \sin \bar{\omega} \bar{\tau} \end{cases} \quad \text{при } \bar{\tau} = 0, \Delta\theta_i = 0, \quad (2)$$

де  $\bar{\omega} = \omega\tau_{02}$  – безрозмірна циклічна частота; знак “+” відповідає синфазному режиму, а знак “-” – протифазному.

У випадку гармонічного збурення температури на входах ТА розв’язки (2) теж гармонічні [1] (усталений режим:  $\bar{\tau} \rightarrow \infty$ )

$$\begin{aligned}\Delta\theta_1 &= Y_1 \cos \bar{\omega}\bar{\tau} + Y_2 \sin \bar{\omega}\bar{\tau}, \\ \Delta\theta_2 &= Y_3 \cos \bar{\omega}\bar{\tau} + Y_4 \sin \bar{\omega}\bar{\tau},\end{aligned}\quad (3)$$

де амплітуди  $Y_j$  складових визначаються зі системи лінійних рівнянь, отриманих підстановкою (3) в (2)

$$\begin{cases} -\bar{\omega}Y_1 + (1 + A_1)Y_2 - A_1Y_4 = E \\ (1 + A_1)Y_1 + \bar{\omega}Y_2 - A_1Y_3 = 0 \\ -A_2Y_2 - \bar{\omega}Y_3 + (1 + A_2)Y_4 = \pm E \\ -A_2Y_1 + (1 + A_2)Y_3 + \bar{\omega}Y_4 = 0. \end{cases}\quad (4)$$

Головний визначник для (4) рівний (внизу для порівняння наведений головний визначник для системи “проточний реактор ідеального змішування (ПРІЗ) + реакція  $A_1 \leftrightarrow \alpha A_2$ ” [1])

$$\begin{aligned}\Delta &= \begin{vmatrix} -\bar{\omega} & 1 + A_1 & 0 & -A_1 \\ 1 + A_1 & \bar{\omega} & -A_1 & 0 \\ 0 & -A_2 & -\bar{\omega} & 1 + A_2 \\ -A_2 & 0 & 1 + A_2 & \bar{\omega} \end{vmatrix} = \\ &= (1 + \bar{\omega}^2)(S^2 + \bar{\omega}^2), \quad S = 1 + A_1 + A_2 \quad [\text{ТА}], \\ \Delta &= \begin{vmatrix} -\bar{\omega} & 1 + a_1 & 0 & -a_2 \\ 1 + a_1 & \bar{\omega} & -a_2 & 0 \\ 0 & -a_1 & -\bar{\omega} & 1 + a_2 \\ -a_1 & 0 & 1 + a_2 & \bar{\omega} \end{vmatrix} = \\ &= (1 + \bar{\omega}^2)(S^2 + \bar{\omega}^2), \quad S = 1 + a_1 + a_2 \quad [\text{ПРІЗ}],\end{aligned}\quad (5)$$

де  $S = 1 + A_1 + A_2$  – деяке сумарне число перенесення. При відсутності теплообміну  $A_i = 0 \Leftrightarrow k = 0 \Rightarrow S_{\text{ТА}} = 1$  – число перенесення ТА як апарата.

Як видно з (5), для системи “проточний ТА ідеального змішування + теплопередача” головний визначник за формою та значенням ідентичний визначнику системи “ПРІЗ + реакція  $A_1 \leftrightarrow \alpha A_2$ ”:  $S = 1 + a_1 + a_2 \Rightarrow S_{\text{ПРІЗ}} = 1$  ( $a_i = \partial \bar{w}_{0i} / \partial c_{0i}$  – статичні чутливості швидкостей  $\bar{w}_{0i}$  реакцій порядків  $n_i$  до квазістаціонарних змін концентрацій  $c_{0i}$  [1]). Отже, в цьому аспекті теплопередачу можна розглядати як деяку “теплову реакцію”.

### Література

1. Лучейко І.Д., Ямко М.П., Гумницький Я.М. Частотні характеристики проточного реактора ідеального змішування при малих збуреннях концентрації реагенту (реакція  $A_1 \leftrightarrow \alpha A_2$ ) // Вісник ТДТУ ім. І. Пулюя. – 2006. – № 3. – С. 195-204.